

水下土体剪切界面摩擦力试验研究

徐金欣,郑建国,许国辉*,房虹汝,刘江娇

(海洋环境与生态教育部重点实验室,青岛 266100;中国海洋大学环境科学与工程学院,青岛 266100)

摘要:基于在自行改进设计的水下土体剪切界面摩擦力测定装置进行的室内试验结果,对不同粒组、含水率及剪切速率条件下土体剪切界面抗剪强度和摩擦力进行了研究。试验结果表明,不同土体间剪切界面抗剪强度和摩擦力与土体颗粒粒组、含水率相关性表现不同。随着含水率的增加,粉砂抗剪强度和摩擦力呈增加趋势,细砂、中砂抗剪强度和摩擦力受含水率变化影响较小。土体颗粒粒组不同,抗剪强度和摩擦力有明显差异,表现在粉砂大于细砂和中砂,小于黏粒含量较高的粉土,细砂和中砂的差别较小。试验条件下得到的粉砂、细砂、中砂土体与粉质土底床间的水下剪切界面摩擦力值在 0.2~1.0 kPa 区间,并结合海洋地质实例说明界面摩擦力的应用。

关键词:摩擦力;抗剪强度;粒组;含水率;剪切速率

中图分类号:P67

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2016.08009

在强风暴浪海况持续的情况下,海底土体在波动压力作用下,孔隙水压力积累,有效应力降低,导致海床发生液化,可引起海底滑坡^[1]。海底的液化或者滑坡的发生会对滑坡区的海洋油气钻探平台、输油管道、海底电缆等海洋工程设施造成破坏^[2]。以往学者们对海底滑坡、碎屑流的研究集中在滑动体的运动模式、机理^[3,4]、运移距离^[5,6]以及沉积物堆积的猜想和描述^[7,8],实际上,海底滑坡在运移过程中,由于水的不断混入,部分滑坡块体不断碰撞破坏演变成碎屑流^[9],滑坡块体或碎屑流在沿斜面下滑过程中与底床之间形成滑动面(或带),其运动学描述的关键之一应该在滑动面(或带)的状态和力学分析上;海床对波浪作用产生动力响应^[10-12],海底土体发生液

化,液化土体的质点会发生波动^[13,14],波动土体与未液化底床之间也可认为是泥沙流体与固定床之间沿一个面(或带)相互运动;海岸泥沙输运过程中,床面剪切力很高的条件下,推移质运动将向深层次发展,在床面层以下作成层运动,其运动区域称为层移区^[15],层移区在下部固定床面上同样是沿一个滑动面(或带)运动。由此将海底泥沙流体沿固定底床上的运动归结为沿滑动面(或带)的摩擦运动问题。

由于环境条件和技术条件的限制,人们难以直接观察到海底斜坡的液化破坏过程以及破坏后块体和碎屑流的长距离运移状况和土体滑动过程中的影响因素及滑动面(带)的状态。于是一些学者考虑用室内模拟实验的方法探究滑动土体与底床土体之间滑动面(带)的力学特性及影响因素。如有研究者利用自行设计的土体界面抗剪强度测定装置,探究不同含水率、黏粒含量的成层土体界面抗剪强度^[16,17]。但是上述工作并没有考虑到滑动面位于水下时的滑动状态及力学变化。因此,液化土体与下伏未液化土体、海底滑坡后的滑坡块体和碎屑流的滑动面处于水下时的剪切力是

收稿日期:2016-03-07

基金项目:国家自然科学基金(41576039)

作者简介:徐金欣(1991—),男,在读硕士,主要从事海洋地质方面的研究工作。E-mail: xujinxin01@126.com

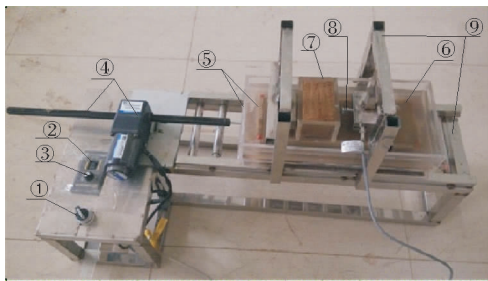
***通讯作者:**许国辉(1972—),男,教授,主要从事海洋工程地质、海岸工程环境方面的研究工作。E-mail: xuguohui@ouc.edu.cn

在探讨海底底床液化和海底滑坡时需要考虑的问题。

1 试验方法

1.1 试验仪器

本试验在自行改进设计的水下土体剪切界面摩擦力测定装置(图 1)中进行,该装置分上、下 2 个剪切盒和外部水槽,剪切盒中可以盛装不同试验土样且 2 个剪切盒无连接,从而保证剪切盒中土体能够沿接触面自由滑动,外部水槽高度高出 2 个剪切盒的接触面 2.5 cm,从而能够满足试验剪切界面处于水下的试验环境。通过改变剪切盒中的土样含水率、粒组,试验剪切速率等条件对不同土体间剪切界面摩擦力进行研究。试验过程中,下剪切盒中盛装土体饱水静置固结一段时间后作模拟底床,上剪切盒中盛装不同性质土体作试验中滑动土体。下剪切盒较长且宽度与上剪切盒长度相等,从而能够保证上剪切盒与下剪切盒的土样接触面积不变。2 个剪切盒之间由滚珠和滑槽相连,试验准备阶段将滚珠涂抹凡士林减少滚动过程中摩擦阻力,保证结果的准确性。下剪切盒由能够改变行进速率的步进机提供不同试验剪切速率,上剪切盒与压力传感器相接触,剪切盒中土体与底床接触,无其余外力影响压力传感器数据采集,可以认为试验过程中所得结果为试验土体与底床土体之间自由状态下剪切过程产生。



①方向调节器;②开关;③速度调节器;④步进机;⑤可盛水的下剪切盒;⑥滑槽及滚珠;⑦上剪切盒;⑧压力传感器;⑨固定支架

图 1 水下土体剪切界面摩擦力测定装置

Fig. 1 Device for measuring the soil interfacial shearing force

1.2 样品制备

本次试验研究不同粒组、含水率、剪切速率条件下土样与底床间剪切力和层间摩擦力,因此,通过筛分得到并配制粒组分别为 0.063~0.075、0.075~0.25、0.25~0.5、0.5~1 mm 的粉砂、细砂、中砂、粗砂备用。

首先,烘干实验室内取自黄河三角洲的粉质土,采用密度计法实验测得该粉土的黏粒含量为 14%~15%、烘干后,配置成含水率 30% 的土体加入下剪切盒,盒中加水静置固结 20 d 做试验底床。将烘干后的砂土配制成含水率为 10%、20%、30% 的粉砂,含水率为 10%、20%、27% 的细砂,含水率为 10%、20% 的中砂土样,通过调节步进机输入频率选取 5.39、7.29、8.45 mm/s 3 个前进速率。为控制试验变量,试验过程中统一选用配制好的 400 g 样品加入上剪切盒中,确保试验土样加剪切盒的自重保持不变。

1.3 试验过程

分别将配好的土样加到上剪切盒中,轻压土样,避免震荡使土样尽量饱和,静置固结一段时间。下剪切盒中加入底床,在靠近压力传感器一侧加上上剪切盒,保持 2 个剪切盒相连接的滑槽和滚珠的清洁。将步进机调节到试验所需剪切速率,调节检查步进机使其与压力传感器接触。打开压力传感器的压力数据采集系统,点击开始,启动步进机,剪切开始,采集压力数据,至压力数据基本不变时停止数据采集,关闭步进机。选取步进机前进速率为 5.39、7.29、8.45 mm/s 3 个剪切速率,进行上述步骤。每组试验土样变量保持不变,进行 3 次重复试验,试验研究不同含水率、砂土粒组、剪切速率条件下土体间剪切界面的摩擦力。

2 试验结果

试验过程中,用计算机实时记录压力传感器的压力数据,此压力为推动上剪切盒沿下剪切盒运动的土体间的作用力。根据公式:

$$\text{剪切力 (kPa)} = \frac{\text{测得的作用力 (N)}}{\text{土体接触面积 (m}^2\text{)} \times 1\,000}$$

剪切位移(cm)=剪切速率(mm/s)×时间(s)/10

处理试验数据得到试验结果,将每一试样的 3 组平行试验结果进行比较,剔除差异较大试验组数据后进行平均,绘制剪切力与剪切位移关系曲线,结果见图 2。

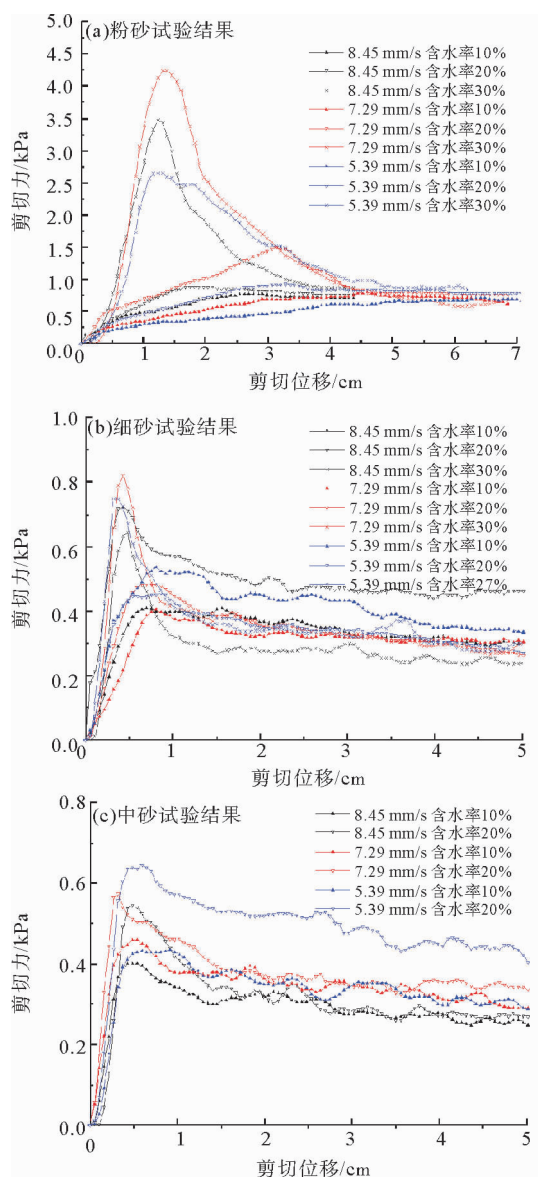


图 2 不同土样试验结果

Fig. 2 The test results of interfacial shear strength for different soil samples

由图 2 可知,在试验过程中,不同试验条件下剪切力测定结果表现出的变化规律都是一致的:随着剪切位移的增大,剪切力先增大到最大值,然

后减小,最后逐步平稳并保持在一个值。但是由于不同土体的剪切状态或者性质不同,随剪切位移的增大,剪切力最大值和平稳值出现的位置并不相同。另外在试验过程中,滑动土体有减损,所以表现在试验结果中的平稳阶段可能有一个较小的下降趋势,从数据来看,粉砂土样试验剪切力最大值和平稳值明显高于细砂、中砂的剪切力最大值和平稳值;随着含水率的变化,不同土样剪切力最大值和平稳值表现出不同的变化规律;在本试验的剪切速率下,土体剪切过程中的摩擦力与剪切速率相关性不明显。

土体具有抵抗剪切破坏的特性,这个特性的极限强度就是土体的抗剪强度;滑动土体与底床土体发生剪切运动,剪切面土体颗粒的相互摩擦产生阻碍土体发生滑动的阻力就是剪切界面上的摩擦力。本试验中,在土样由原始的稳定状态到发生剪切破坏并产生一定的剪切位移的过程中表现出的最大剪切力就是土体界面的抗剪强度,而剪切力稳定值的平均值是界面摩擦力。

3 结果分析与讨论

为反映土体界面抗剪强度和界面摩擦力与土样粒组、含水率的关系,根据试验结果分别绘制出不同含水率、不同粒组土样剪切力的变化图,如图 3 所示。

图 3a、b 中,在相同含水率的条件下,粉砂土样抗剪强度和摩擦力都明显大于细砂和中砂土样的抗剪强度和摩擦力。土样含水率由 10% 到 30% 增大过程中,粉砂和细砂、中砂的抗剪强度都逐渐增大,其中粉砂增幅明显,细砂、中砂的增幅较小;细砂和中砂在相同含水率条件下摩擦力基本相等,且随着含水率变化没有较大的改变,只有粉砂的摩擦力保持增加的趋势。

分析上述原因主要是粉砂颗粒较小,含较多的亲水矿物,颗粒间主要由结合水连结或者微弱的毛细连结,抗剪强度主要决定于粒间连结强度;随着土体中的结合水增加,粉砂颗粒间形成不同厚度的结合水膜,土体剪切过程中,主要是结合水膜的相互摩擦,实质是结合水的黏滞阻力;粉砂颗粒较小,比表面积较大,受水分子间力作用较明显,含水率为较小的 10% 时,粉砂的内聚力较小,

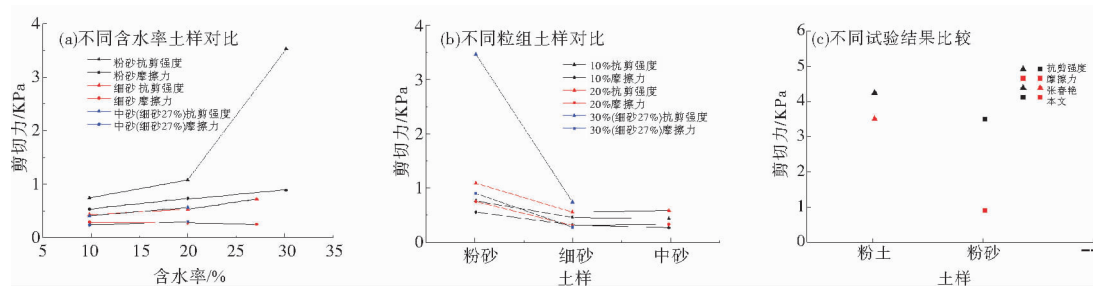


图 3 不同土样试验结果比较

Fig. 3 Comparison of the test results from the different soil samples

抗剪强度主要表现在内摩擦力上,当含水率逐渐增大到 30% 时,粉砂的内聚力逐渐增大。颗粒相对较粗的细砂、中砂抗剪强度主要取决于内摩擦力,即土颗粒之间的表面摩擦阻力和颗粒间咬合力,土体的内摩擦系数主要取决于土体颗粒表面的粗糙程度和交错排列的咬合情况,粉砂的密实度较大,土体的内摩擦系数较大,表现出的抗剪强度也就较大,细砂、中砂颗粒相对较粗,在运动过程中易滚动而减小摩擦力。

如图 3c 中,含水率 30% 的粉砂与粉土^[16]试验结果比较可以看出,相同含水率情况下,粉土抗剪强度和摩擦力明显比粉砂大,摩擦力的差值明显。这也反映了上述分析的合理性,粉土、粉砂土样中的较小颗粒决定了他们的土体性质和力学特性表现区别于细砂、中砂;粉土中的黏粒含量明显较高,在剪切力数值上就明显大于粉砂。从图 3 中可以看出,粉土摩擦力在 3.5 kPa 左右大于粉砂的 0.6 ~ 1 kPa 和细砂、中砂的 0.26 ~ 0.32 kPa。

碎屑流、层移质、液化土体等泥沙与水的混合流体与其下部土体构成的滑动床面间,在运动过程中会产生摩擦耗损,其中滑动剪切界面的摩擦力是表征耗能的一个重要项。本文开展的水下土体剪切界面摩擦力的测定即是针对此问题进行。由于泥沙和水混合体中的泥沙可能存在砂、粉砂、黏土等粒级,流动也可能经历不同的泥沙组成的底床土体,因此,开展了粉质土、粉砂、砂粒土样之间的界面抗剪性和摩擦力测试研究,为实际的不同地点、不同物理特性土体滑动摩擦力的估计提供了参考数据。试验装置上剪切盒高度较小,主要是考虑水下滑动的泥沙受到水流携带产生上举

力,运动的泥沙对底床仅有较小的正应力。

以海底碎屑流运动为例,说明本文水下剪切界面摩擦力的应用:

如图 4 所示,在海底碎屑流形成后,水沙混合流动体 a 沿坡角为 α 的坡面作加速运动(其中同样应考虑水流携带的泥沙与固定底床的摩擦耗能),假设到达坡脚水平处时,水沙混合流动体具有动能 E 。当流动体 a 在只受到来自周围水体的与运动方向相反的阻力 f_w ,不考虑底床之间摩擦阻力 f 时,流动体能够运动到水平距离为 L_1 的位置 1 处;当考虑流动体 a 在水平运移过程中受到水的冲击阻力 f_w ,同时还受到底床给予流动体的摩擦阻力 f 时,流动体能够运动到水平距离为 L_2 的位置 2 处。不考虑水沙混合体内部摩擦产热和碰撞耗能,则水平位移上阻力做功等于初始动能 E 。

根据能量守恒定律,只考虑周围水体阻力, $E = f_w \times L_1$;考虑底面摩擦阻力和水体阻力,则 $E = (f_w + f) \times L_2$ 。

将 2 种情况整合:则 $f_w \times L_1 = (f_w + f) \times L_2$,即摩擦耗能 $Q = f \times L_2 = f_w \times (L_1 - L_2)$ 。

上述计算式表明,海底碎屑流发生后形成的水沙混合流动体,在运动过程中受到底面摩擦阻力的作用,造成摩擦耗能,使原本能够在只受水体阻力作用下的水平运移距离减小。根据水沙混合



图 4 剪切界面摩擦力应用示意图

Fig. 4 Sketch of the application of interfacial shearing force

体中泥沙组分和经过的底床土体成分,可以选择本文中所测定的不同成分间的剪切界面摩擦力来计算给出水沙混合流动体与底床界面的摩擦耗能。

4 结论

针对计算水和泥沙混合体在底床上滑动的距离、沉积条件等需要考虑滑动摩擦造成的能量损耗问题,开展了粉砂、细砂、中砂土样与粉质土底床间在水下的剪切界面摩擦力研究工作,得出以下结论:

(1)不同土体间剪切界面抗剪强度和摩擦力与土体粒组、含水率的相关性表现出较大差异。粉砂抗剪强度和摩擦力随着含水率增大,有逐渐增加的趋势;细砂、中砂土样受含水率变化影响较小。粉砂抗剪强度和摩擦力大于细砂和中砂,小于相对黏粒含量较高的粉土;细砂和中砂的差别不明显;土体剪切过程中摩擦力与剪切速率相关不明显。

(2)在本试验条件下,粉砂土样与粉质土底床之间水下剪切界面的摩擦力值在 $0.6\sim 1\text{ kPa}$ 之间,细砂、中砂土样与粉质土底床之间水下剪切界面的摩擦力值在 $0.26\sim 0.32\text{ kPa}$ 之间。

本文所得到的试验数据可以为研究海底碎屑流运动、海岸工程泥沙层移以及海底土体液化中剪切界面摩擦力的估算提供数据参考。

参考文献:

- [1] 王立忠,潘冬子,潘存鸿,等.波浪对海床作用的试验研究[J].土木工程学报,2007,40(9):101-108.
- [2] 李家钢,修宗祥,申宏,等.海底滑坡块体运动研究综述[J].海岸工程,2013,31(4):68-78.
- [3] 程谦恭.高速远程滑坡-碎屑流“裹气流态化”减阻机理研究[J].学术动态,2012,(1):1-8.
- [4] 王玉峰,程谦恭,张柯宏,等.高速远程滑坡裹气流态化模型试验研究[J].岩土力学,2014,35(10):2775-2786.
- [5] 胡光海,刘忠臣,孙永福,等.海底斜坡土体失稳的研究进展[J].海岸工程,2004,23(1):63-72.
- [6] 杨林青.海底斜坡稳定性及滑移影响因素分析[D].大连:大连理工大学,2012.
- [7] 庞雄,陈长民,朱明,等.深水沉积研究前缘问题[J].地质论评,2007,53(1):36-43.
- [8] 胡孝林,刘新颖,刘琼,等.深水沉积研究进展及前缘问题[J].中国海上油气,2015,27(1):10-18.
- [9] Locat J, Lee H J. Submarine landslides: Advances and challenges [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39: 193-212.
- [10] 别社安,赵子丹,刘同利,等.波浪作用下沙床中的孔隙水压力响应模型实验研究[J].海洋通报,1997,16(5):56-65.
- [11] 钟佳玉,郑永来,倪寅.波浪作用下砂质海床孔隙水压力的响应规律实验研究[J].岩土力学,2009,30(10):3188-3193.
- [12] Jeng D S, Lee T L. Dynamic response of porous seabed to ocean waves[J]. Computers and Geotechnics, 2001, 28(2): 99-128.
- [13] 王欣.波浪作用下粉质土底床液化后运动特征的试验研究[D].青岛:中国海洋大学,2010.
- [14] 王欣,许国辉,孙永福,等.黄河水下三角洲液化海底的重新层化及其试验求证[J].海洋地质与第四纪地质,2013,33(6):29-40.
- [15] 魏龙,王义刚,黄惠明.推移层厚度研究综述[J].泥沙研究,2013,(2):72-80.
- [16] 许国辉,房虹汝,张春艳,等.成层土体界面抗剪强度试验研究[J].海岸工程,2015,34(1):11-19.
- [17] 张春艳.细粒土剪切界面摩擦力试验研究[D].青岛:中国海洋大学,2013.

Key words: pre-drilling pressure prediction; high precision speed processing; optimization of calculation methods; error correction